

УДК 621.891.2

**ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОК ПРИ ТРИБОВЗАИМОДЕЙСТВИИ И ЕЁ ВЛИЯНИЕ НА РЕСУРС УЗЛОВ ТРЕНИЯ****д-р техн. наук, доц. В.И. ЖОРНИК****(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск)**

*Представлен механизм эволюции структуры дисперсной фазы пластичного смазочного материала в процессе трибовзаимодействия пары трения. Показано, что разрушение пластичных смазок, модифицированных наноразмерными добавками, происходит на более поздних стадиях трибоконтакта по сравнению со стандартными смазками и обусловлено повышенной прочностью и улучшенной маслоудерживающей способностью бинарной дисперсной фазы модифицированных смазок. При этом освобождающиеся из структурного каркаса наноразмерные частицы противозадирных добавок продолжают обеспечивать высокую работоспособность смазочного материала на поздних стадиях трибовзаимодействия. Анализ структуры дисперсной фазы смазочного материала на любом этапе триботехнических испытаний или эксплуатации узла трения позволяет судить о работоспособности пластичной смазки и оценить ее остаточный ресурс.*

**Введение.** Ресурс узлов трения машин и механизмов в значительной степени определяется работоспособностью применяемых смазочных материалов, среди которых широкое распространение получили пластичные смазочные материалы (ПСМ). В общем случае ПСМ можно рассматривать как двухкомпонентные коллоидные системы, в которых дисперсионная среда (75...95 мас. %) представляет собой масло, а дисперсная фаза (5...25 мас. %) – твердый загуститель, в качестве которого могут выступать соли высокомолекулярных карбоновых кислот, твердые углеводороды (парафин, церезин и т.п.), высокодисперсные неорганические (силикагель, бентониты, графит и т.п.) и органические (сажа, пигменты, полимеры, производные мочевины и т.п.) материалы с хорошо развитой удельной поверхностью, способные к структурообразованию в неводных средах [1]. Пластичные смазочные материалы являются высокоструктурированными тиксотропными дисперсиями, образованными трехмерным структурным каркасом дисперсной фазы, в ячейках которого капиллярными, адсорбционными и другими физическими связями удерживается дисперсионная среда (смазочное масло) [2].

Эффективными модификаторами смазочных материалов являются наноразмерные добавки различной природы, которые обладают структурирующими свойствами и могут обеспечить формирование бинарной дисперсной фазы, состоящей из наночастиц добавки и коротковолокнистых волокон загустителя и характеризующейся большей разветвленностью и повышенной маслоудерживающей способностью [3].

Целью настоящей работы являлось изучение эволюции структуры дисперсной фазы различных смазочных материалов, в том числе модифицированных наноразмерными добавками, в процессе трибоконтактирования пары трения и установление взаимосвязи между характером структуры дисперсной фазы пластичного смазочного материала и его работоспособностью.

**Методика проведения исследований.** Триботехнические испытания ПСМ проводилась на машине трения АТВП-2, работающей по схеме возвратно-поступательного перемещения контактирующих тел, по методике, изложенной в [4]. Испытания проводились на паре трения «металлопластмассовая лента DX1– сталь 40ХН» при удельной нагрузке 25, 50 и 75 МПа. Твердость поверхности трения контртела из закаленной стали 40ХН (50...52 HRC), показатель шероховатости поверхности Ra 0,32. Объектом исследования являлась дисперсная фаза литиевой смазки Литол-24 стандартного состава (ГОСТ 21150-75) и комплексной литиевой смазки ИТМОЛ-150Н с бинарной дисперсной фазой, содержащей наноразмерные алмазно-графитовые частицы [3], в исходном состоянии и на различных стадиях триботехнических испытаний при удельной нагрузке 50 МПа. Исследование структуры дисперсной фазы ПСМ осуществлялось с использованием средств сканирующей электронной микроскопии по методике [5].

**Результаты исследований и их обсуждение.** Смазка Литол-24 представляет собой простую литиевую смазку, в которой дисперсная фаза образована литиевой солью 12-гидрооксистеариновой кислоты и составляет 10 мас. %, а дисперсионной средой является индустриальное масло И-40. В смазке присутствует антиокислительная присадка ВНИИНП-357 в количестве 0,5 мас. %.

Смазка ИТМОЛ-150Н – комплексная литиевая смазка, в которой дисперсная фаза образована комплексной литиевой солью 12-гидрооксистеариновой и борной кислот и составляет 10 мас. %, а дисперсионной средой является индустриальное масло И-40. В смазку ИТМОЛ-150Н введены: твердые добавки (дисульфид молибдена (2 мас. %); диатомит (1 мас. %); перлит (1 мас. %); алмазно-графитовая шихта (0,1 мас. %)), также в ней присутствует антиокислительная присадка ВНИИНП-357 в количестве 0,5 мас. %.

Структура дисперсной фазы смазки Литол-24 в исходном состоянии представлена на рисунке 1.

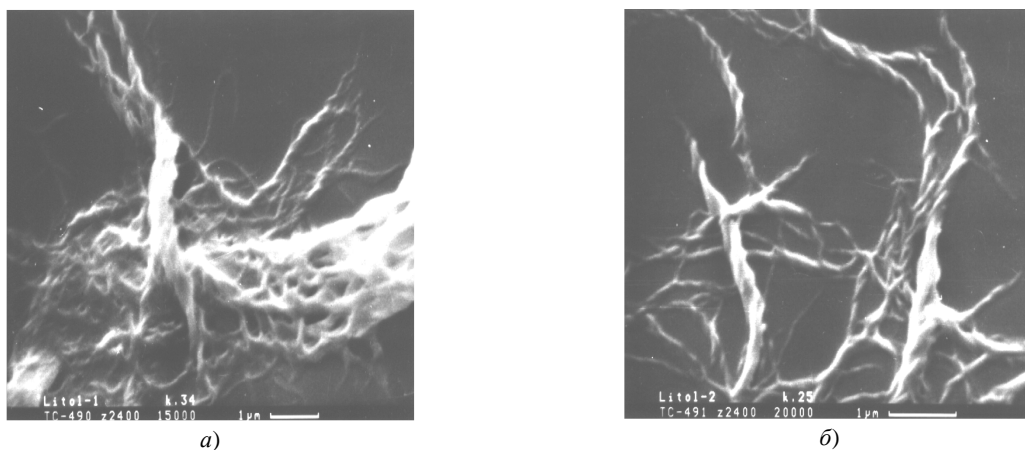


Рис. 1. Микроструктура дисперсной фазы смазки Литол-24 в исходном состоянии при различном увеличении

Как видно, дисперсная фаза имеет ярко выраженную волокнистую структуру. Волокна толщиной до 0,05 мкм сплетены в жгуты диаметром от 0,1 до 0,5 мкм, длина волокон превышает 10 мкм.

Исследование структуры дисперсной фазы смазки Литол-24 после триботехнических испытаний (путь трения – 10 км) показало, что в процессе трибоконтактирования структура дисперсной фазы претерпевает существенные изменения. При этом под деформационно-термическим воздействием происходит дробление ее волокон и их компактирование. Тонковолокнистая структура, характерная для исходной смазки Литол-24, после 10 км пути трения встречается только в отдельных местах (рис. 2, а, б). При этом волокна выпрямились и увеличились по толщине в 5 раз, кроме того, значительно укоротилась их длина. Образовавшиеся при трении конгломераты дисперсной фазы имеют уплотненную структуру с остатками волокнистого строения (рис. 2, в, г).

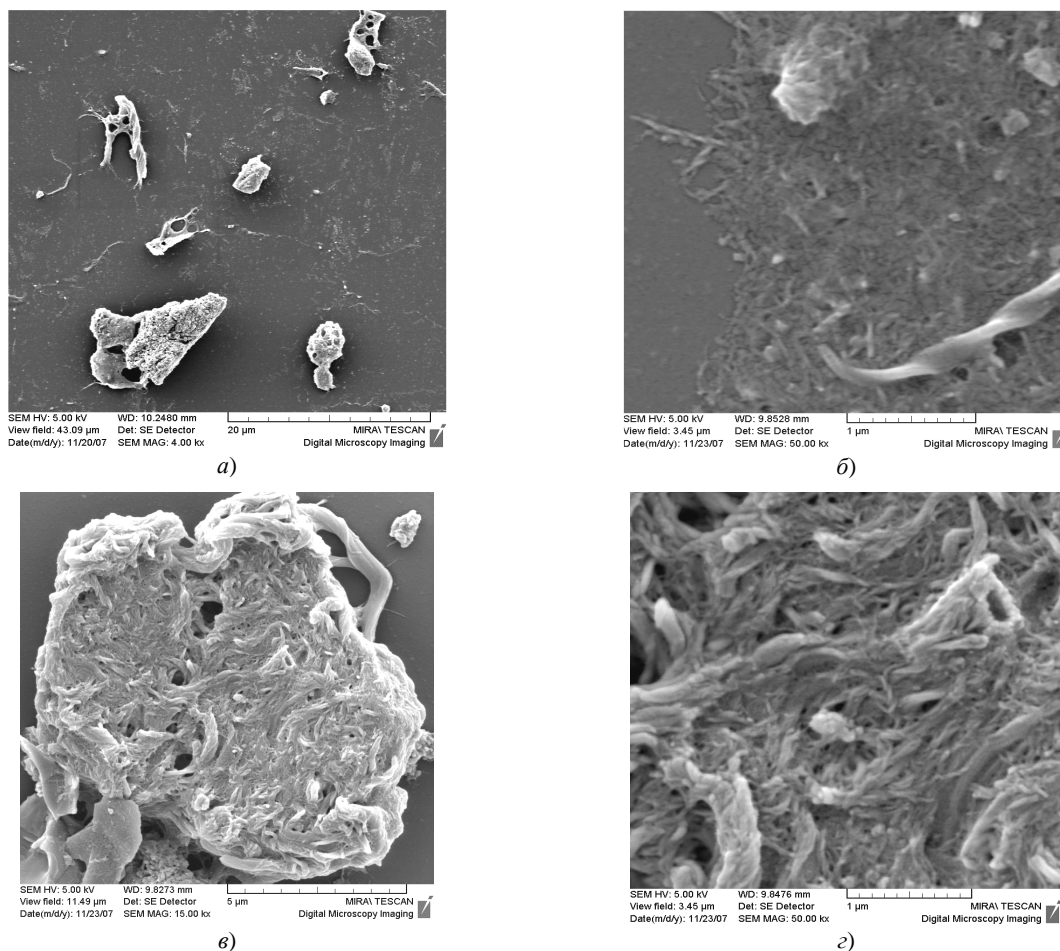
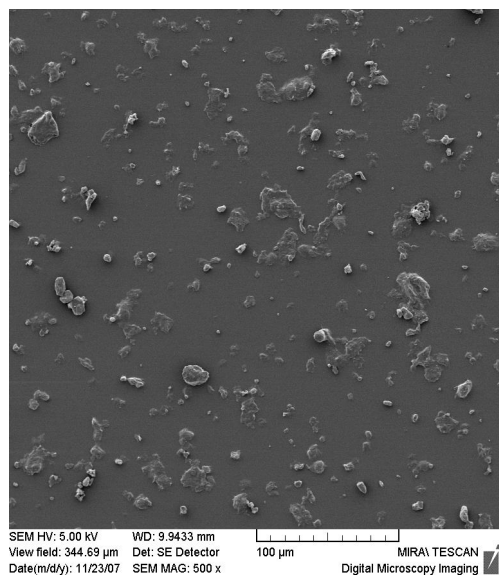


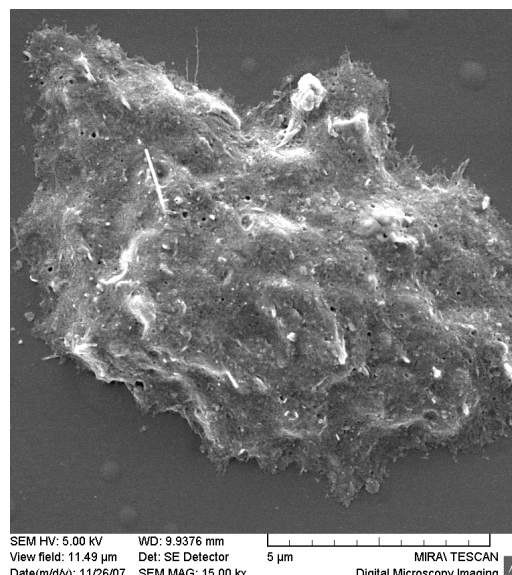
Рис. 2. Микроструктура смазки Литол-24 после 10 км пути трения при различном увеличении

После прохождения 15 км пути трения структура дисперсной фазы смазки Литол-24 выглядит еще более деградировавшей (рис. 3). В этом случае наблюдаются два вида структурных составляющих – «островки» и конгломераты. «Островки» представляют собой уплотненные образования из полностью разрушившихся волокон, которые распались на глобулы, заполненные дисперсионной средой (рис. 3, а, б).

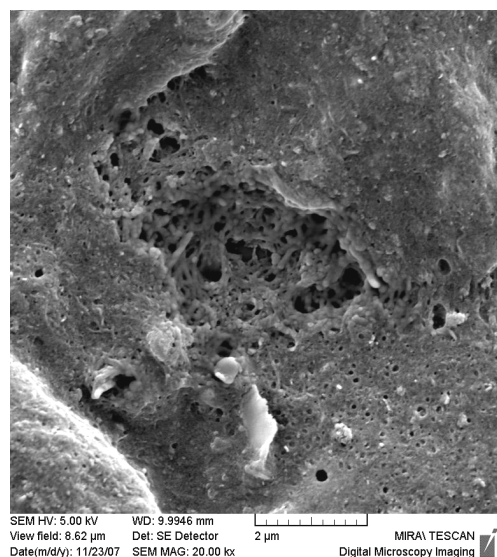
В конгломератах на отдельных участках еще сохранилась волокнистая структура (рис. 3, в, г), однако волокна значительно увеличились в размерах (толщина их не менее 0,5 мкм).



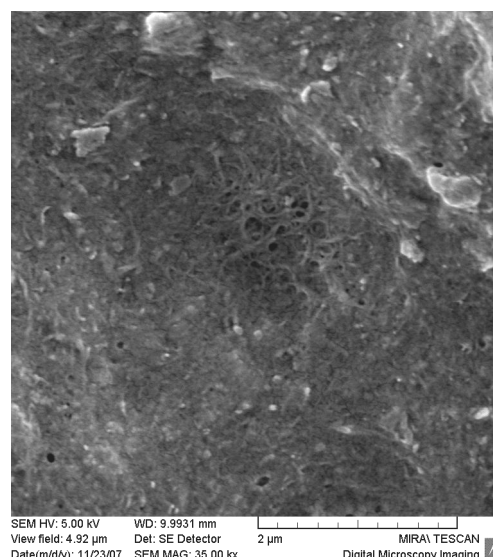
а)



б)



в)



г)

Рис. 3. Микроструктура смазки Литол-24 после 15 км пути трения при различном увеличении

Таким образом, в процессе работы пары трения пластичный смазочный материал испытывает в зоне трибоконтакта интенсивное деструктирующее воздействие, в результате которого происходит быстрое разрушение длинноволокнистой структуры дисперсной фазы простых литиевых смазок.

Структура дисперсной фазы смазки ИТМОЛ-150Н с алмазосодержащим пакетом добавок в исходном состоянии представлена на рисунке 4.

Как видно, структура дисперсной фазы представлена сложным комплексом прямых ровных волокон и включений добавок, оплетенных более мелкими волокнами.

Прямые волокна длиной 1...8 мкм и толщиной 0,1...0,5 мкм образованы комплексной литиевой солью 12-гидроксистеариновой и борной кислот.

Крупные включения имеют размеры 2...6 мкм и образованы введенными в смазку твердыми добавками дисульфида молибдена, диатомита, перлита и алмазно-графитовой шихты.

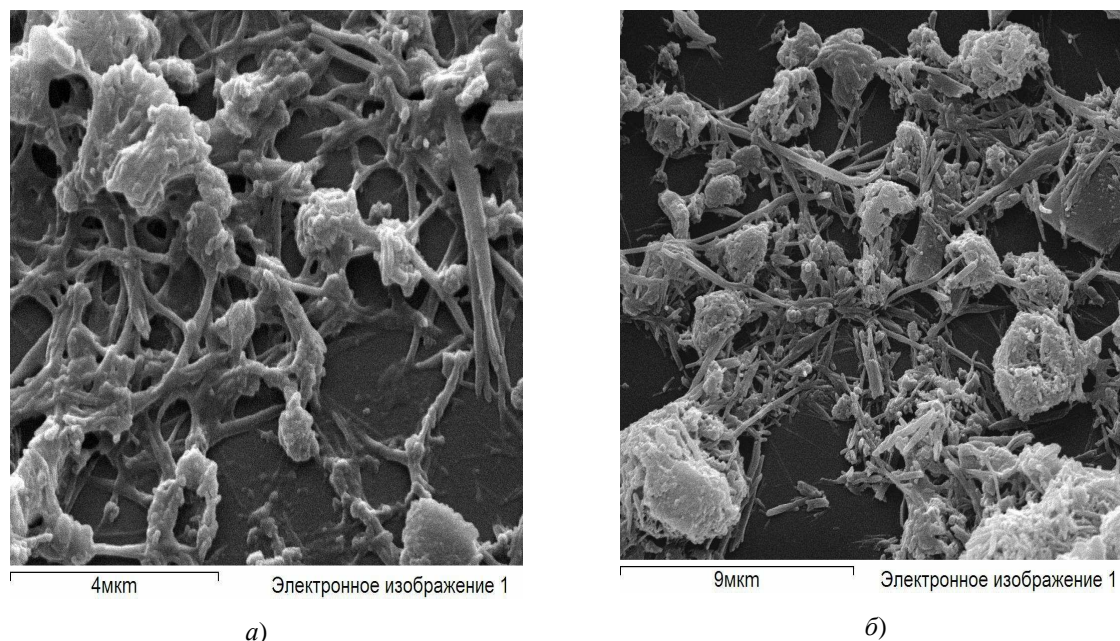


Рис. 4. Микроструктура дисперсной фазы смазки ИТМОЛ-150Н с алмазосодержащим пакетом присадок в исходном состоянии при различном увеличении

Из представленных иллюстраций видно, что добавки оплетены волокнами комплексной соли. Данный эффект обусловлен специальным технологическим приемом модифицирования ПСМ наноразмерными добавками [3], предполагающим введение последних в состав смазочной композиции до начала процесса образования структуры дисперсной фазы. В результате поверхность добавок покрывается оболочкой структурированных комплексных солей, и дальнейший рост волокон дисперсной фазы идет от поверхности частиц.

Таким образом, частицы антифрикционных добавок содержатся в загустителе полученного смазочного материала, образуя при этом бинарную дисперсную фазу (твердые частицы дисульфида молибдена, диатомита, перлита и УДА связаны физическими и адсорбционными силами с комплексной литиевой солью), отличную от простых мыльных загустителей типа оксистеарата лития (Литол-24). Данный эффект усиливается с уменьшением размеров частиц, при этом образуется разветвленный коротковолокнистый каркас дисперсной фазы со стабилизированными в нем и равномерно распределенными по всему объему смазочного материала твердыми частицами добавки.

В случае взаимодействия пары трения в присутствии комплексной литиевой смазки, модифицированной наноразмерными добавками, во-первых, разветвленная коротковолокнистая структура бинарной дисперсной фазы обеспечивает большую маслоудерживающую способность и, следовательно, большую нагрузочную способность смазочного материала, во-вторых, при разрушении структурного каркаса твердые частицы, входящие в состав волокон дисперсной фазы, высвобождаются и попадают в зону трения в активном состоянии, сохранив сверхмалые размеры, и продолжают работать как противозадирная добавка.

Реализовать подобный механизм функционирования противозадирных добавок возможно только в пластичном смазочном материале, загущенном относительно крупными волокнами дисперсной фазы. Наиболее приемлемым в данном случае загустителем является комплексная литиевая соль, так как ее дисперсная фаза имеет крупноволокнистую структуру, облегчающую внедрение в нее твердых частиц. В процессе приготовления комплексной литиевой смазки используются агрессивные компоненты (гидроокись лития, ортоборная и терефталевая кислоты), которые способствуют диспергированию частиц и активации их поверхности. При синтезе комплексной литиевой смазки реакционная масса подвергается



воздействию высоких температур, что способствует активации поверхности частиц добавок и их внедрению в структурный каркас дисперсной фазы.

Исследование структуры дисперсной фазы смазки ИТМОЛ-150Н с алмазосодержащим пакетом добавок после триботехнических испытаний на пути трения 10 км практически не выявило изменений в структуре ее дисперсной фазы (рис. 5, а), а после испытаний на пути трения 15 км появились признаки изменения структурного каркаса смазки ИТМОЛ-150Н, однако деградация структуры дисперсной фазы прошла не так глубоко, как в случае тонковолокнистой структуры простой литиевой смазки (рис. 5, б–г). Упаковка коротких прямых волокон стала менее плотной, длина волокон несколько уменьшилась. Наблюдаются элементы разрушенных волокон длиной 1...2 мкм и сросшиеся волокна толщиной 0,5...1,0 мкм. Однако в целом коротковолокнистые прямые элементы структуры дисперсной фазы остались без изменения, что говорит об их более высокой нагрузочной способности по сравнению с дисперсной фазой простой литиевой смазки.

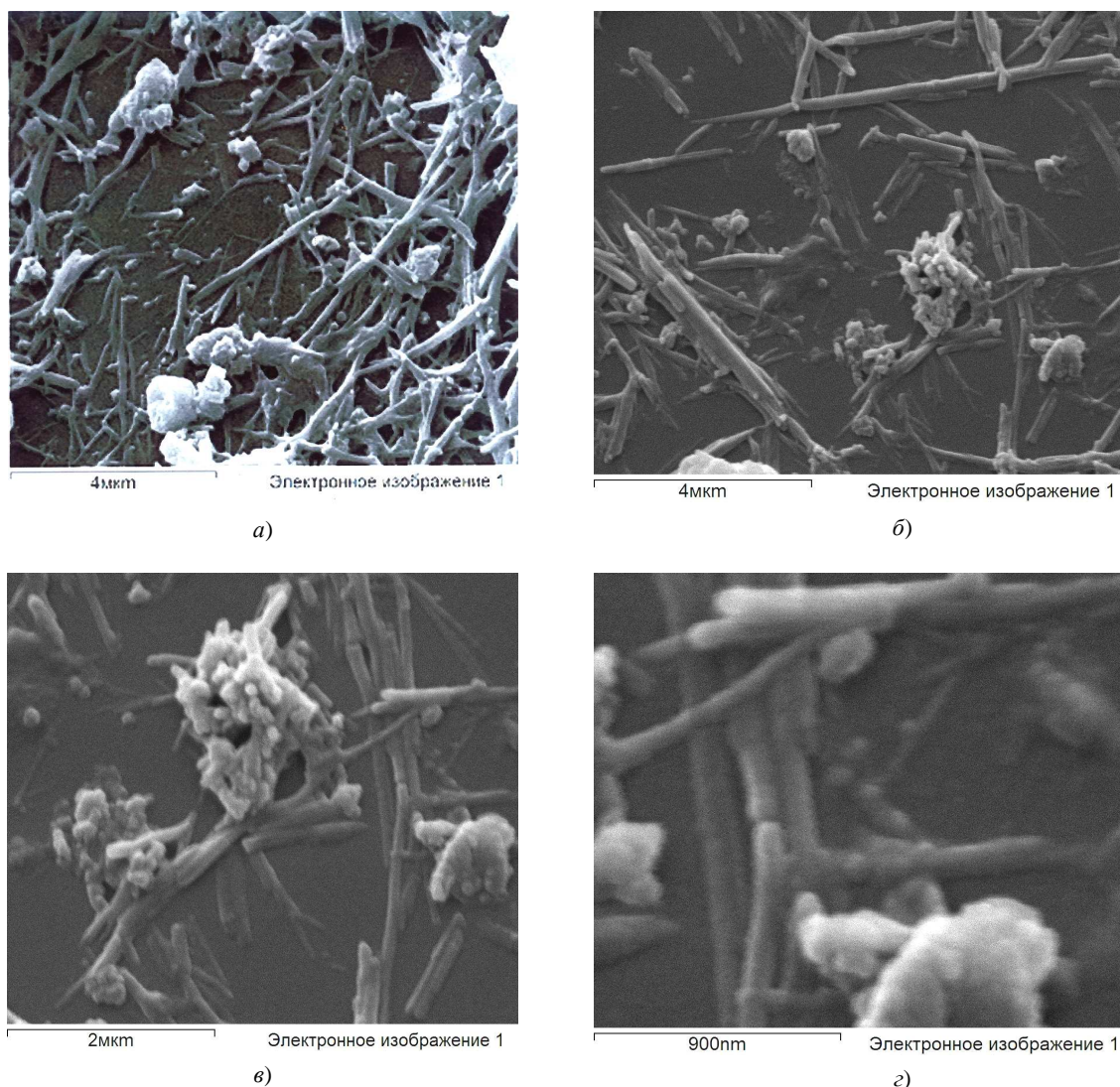


Рис. 5. Микроструктура дисперсной фазы смазки ИТМОЛ-150Н алмазосодержащим пакетом добавок после 10 км (а) и 15 км (б, в, г) пути трения при различном увеличении

После прохождения 25 км пути трения наблюдается разрушение структурного трехмерного каркаса смазки ИТМОЛ-150Н. Коротковолокнистая структура дисперсной фазы, характерная для исходной смазки ИТМОЛ-150Н с алмазосодержащим пакетом добавок, встречается только в отдельных местах (рис. 6, а, б). В основном волокна полностью разрушились и не образуют какой-либо упорядоченной структуры. Однако на этом фоне хорошо видны твердые добавки (рис. 6, в, г), которые практически не разрушились и остались в дисперсной фазе даже после столь длительного деформационно-термического воздействия, что

свидетельствует о высокой способности комплексной литиевой смазки удерживать частицы добавок в зоне трения, не позволяя им агломерировать и выдавливаться в «мертвые» зоны узла трения.

Состояние слоистых твердых добавок также может служить признаком работоспособности смазочного материала. При этом как излишнее измельчение слоистых твердых добавок до размеров менее 1 мкм, так и их агломерирование до размеров более 25...30 мкм является нежелательным.

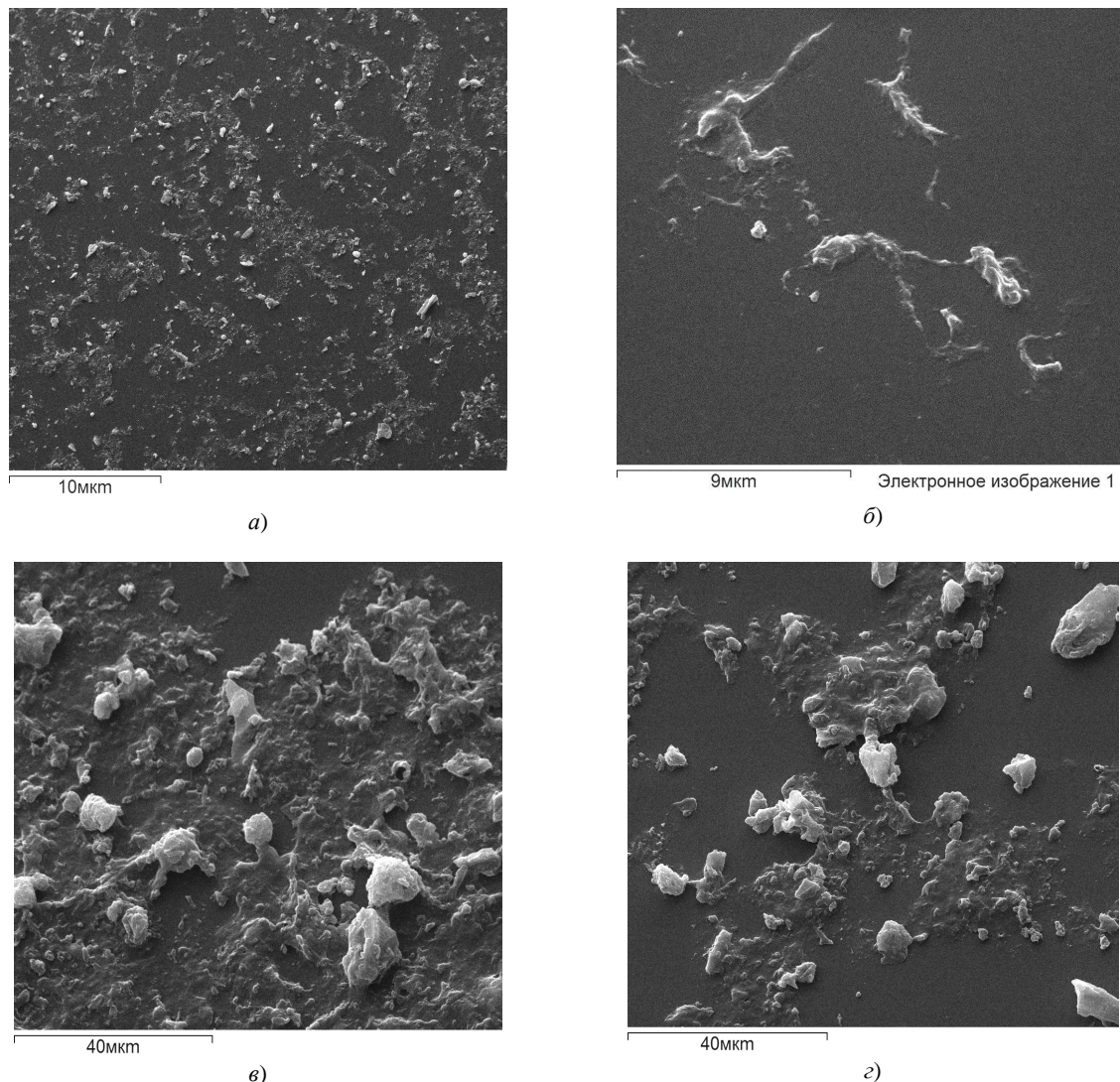


Рис. 6. Микроструктура дисперсной фазы смазки ИТМОЛ-150Н с алмазосодержащим пакетом добавок после 25 км пути трения при различном увеличении

На рисунке 7 приведены зависимости линейного износа для металлопластмассовой ленты DX1 от пути трения при удельной нагрузке 25, 50, и 75 МПа.

Анализ полученных данных свидетельствует:

- использование пластичной смазки с пакетом наноразмерных добавок приводит к интенсификации приработки и ускоренному выходу процесса фрикционного взаимодействия на стадию установившегося трения;
- при увеличении давления испытаний процесс приработки трибосопряжения ускоряется;
- использование пакета добавок снижает интенсивность изнашивания на стадии установившегося трения, что связано с модифицированием поверхностных слоев элементов пары трения алмазно-графитовыми частицами и образованием в бронзовой подложке наноразмерных ячеистых структур [6].

Приведенные данные по величине износа поверхности металлопластмассовой ленты показывают, что использование смазочного материала, модифицированного ультрадисперсными твердыми частицами различной природы в диапазоне нагрузок 25...50 МПа, снижает интенсивность изнашивания испыты-

ваемого материала, причем эффективность действия этих добавок увеличивается по мере повышения удельной нагрузки в зоне трибоконтакта.

При нагрузке 75 МПа положительный эффект от применения модифицированной смазки проявляется в случае использования ее только на начальной стадии испытаний, по сути – на стадии приработки.

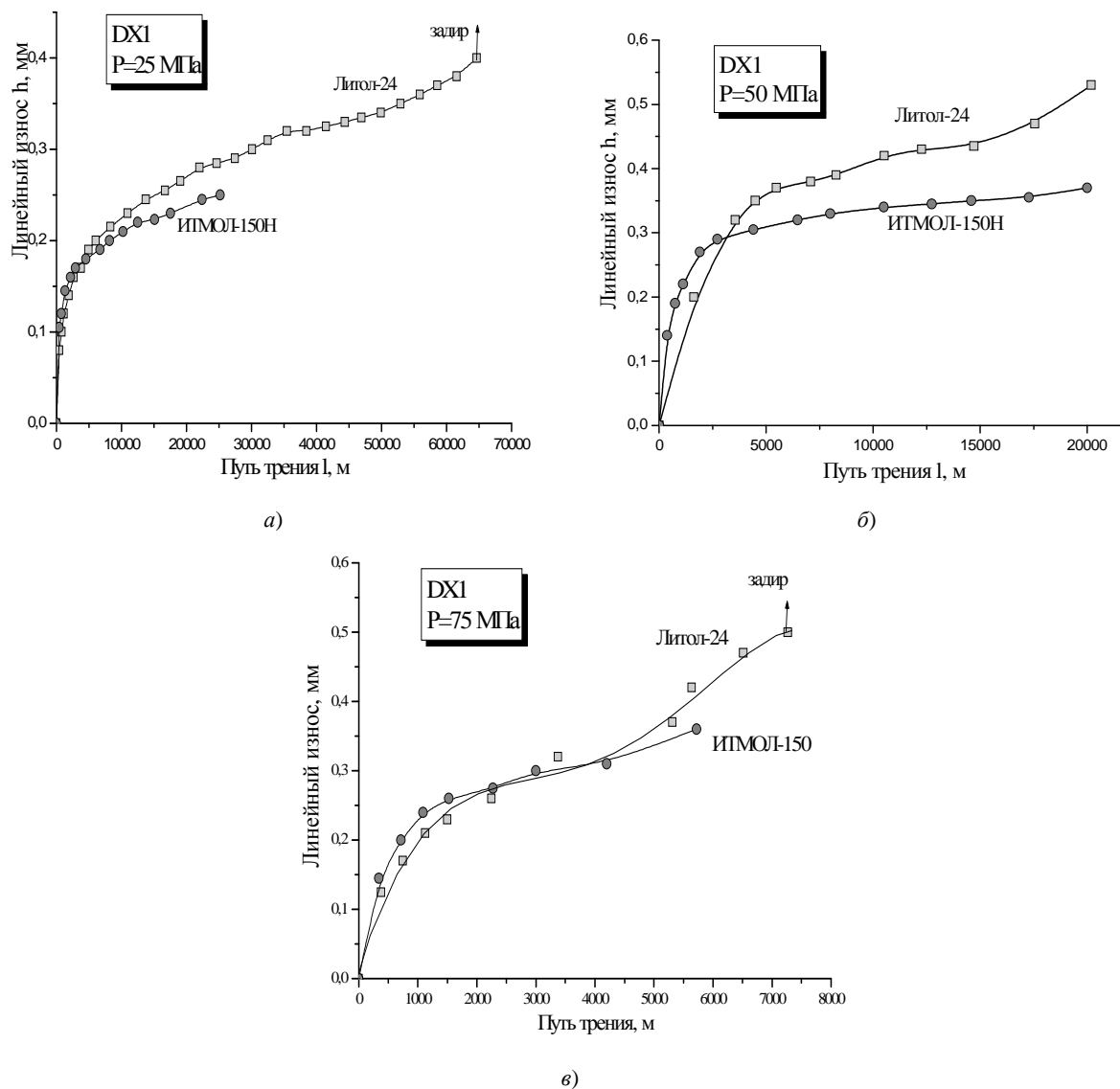


Рис. 7. Зависимость величины линейного износа образцов металлопластмассовой ленты DX1 от пути трения в среде смазок Литол-24 и ИТМОЛ-150Н при различной удельной нагрузке: а – 25 МПа; б – 50 МПа; в – 75 МПа

Повышение износостойкости металлопластмассовой ленты при использовании смазочного материала с ультрадисперсными твердыми добавками можно объяснить совместным действием ряда факторов, способствующих улучшению трибологических свойств самого смазочного материала и изменяющих структуру поверхности трения за счет эффектов дисперсного упрочнения и трибомеханического модифицирования. Включенные в состав бинарной дисперсной фазы смазочного материала наноразмерные частицы повышают коллоидную стабильность смазочного материала, увеличивая маслоудерживающую способность структурного каркаса смазки, придают смазочному материалу противозадирные свойства, что в совокупности приводит к повышению стабильности и нагрузочной способности смазочного слоя. Обеспечение регулярного смазочного режима в зоне трибоконтакта способствует снижению термической нагруженности материалов трущейся пары в зоне трения и повышению структурной устойчивости полимерной составляющей металлопластмассовой ленты. Имеющиеся в составе смазочного материала твердые наноразмерные частицы формируют в металлической поверхности износостойкую ячеистую



структуру за счет процессов интенсивного пластического деформирования и обеспечивают дисперсное упрочнение контактирующих поверхностей за счет их шаржирования в процессе трения.

Прогнозная оценка влияния эволюции структуры дисперсной фазы пластичного смазочного материала на ресурс пар трения на примере шаровой опоры цилиндра подвески карьерного самосвала БелАЗ проведена на основе анализа значений средней интенсивности изнашивания металлопластмассовой ленты DX1, полученных при лабораторных испытаниях.

Для сравнения выбраны результаты триботехнических испытаний при удельных нагрузках 25 и 50 МПа в присутствии пластичных смазок Литол-24 и ИТМОЛ-150Н (таблица).

Прогнозный ресурс вкладыша шаровой опоры карьерного самосвала БелАЗ

Материал образца	Смазочный материал	Удельная нагрузка, МПа	Путь трения, км	Линейный износ, мкм	Средняя интенсивность изнашивания, мкм/км	Допустимая величина износа, мм	Прогнозный ресурс (путь трения), км
Металло-пластмассовая лента DX1	Литол-24	25	64,65	380	5,9	0,4	68
		50	20,2	530	26,2		15
	ИТМОЛ-150Н	25	41,4	120	2,9		138
		50	20,0	370	18,5		22

Сопоставление результатов лабораторных испытаний пары трения «металлопластмассовая лента DX1 – сталь 40ХН» указывает на перспективность применения комплексной литиевой смазки ИТМОЛ-150Н с пакетом наноразмерных добавок, поскольку обеспечивает увеличение прогнозного ресурса вкладыша шаровой опоры в 1,5...2,0 раза.

Пластичная комплексная литиевая смазка ИТМОЛ-150Н с пакетом наноразмерных добавок показывает высокую эффективность в тяжело нагруженных (20...50 МПа) низкоскоростных (до 1,0 м/с) узлах трения при контактировании пары трения «высокопрочный материал – пластичный материал». Эта смазка обладает приработочным эффектом с созданием в контактирующих элементах упрочненных поверхностных слоев повышенной износостойкости. Смазка ИТМОЛ-150Н является совместимой с любой литиевой смазкой, что позволяет взаимозаменять их на стадии эксплуатации.

Анализ карты смазывания карьерных самосвалов БелАЗ и нагрузочно-скоростного режима эксплуатации их узлов трения показывает, что смазка ИТМОЛ-150Н с пакетом наноразмерных добавок может быть применена при конвейерной сборке ряда узлов карьерного самосвала. Применение смазки ИТМОЛ-150Н с пакетом твердых добавок, обладающей приработочным эффектом, наиболее целесообразно в низкоскоростных тяжело нагруженных узлах трения скольжения, к числу которых относятся:

- центральный шарнир передней подвески;
- шарниры поперечной штанги передней подвески;
- шарниры цилиндров передней подвески;
- упорные подшипники поворотных кулаков;
- шарниры поперечной штанги задней подвески;
- шарниры цилиндров задней подвески; пальцы задних опор подвески;
- центральный шарнир задней подвески.

Применение в указанных узлах модифицированной пластичной смазки позволит повысить качество выпускаемой карьерной техники и снизить затраты на ее эксплуатацию.

**Заключение.** На основании результатов исследования дисперсной фазы смазок Литол-24 стандартного состава и ИТМОЛ-150Н с пакетом наноразмерных добавок выявлен механизм эволюции структуры дисперсной фазы пластичного смазочного материала (ПСМ) в процессе трибоконтактирования пары трения в присутствии ПСМ, который включает следующие этапы:

- 1) разрыв связей между волокнами и нарушение трехмерности каркаса;
- 2) разрушение волокон, сопровождающееся их дроблением на более мелкие элементы и хаотичным образованием из них плотных структур со слабопроявляющейся волокнистой структурой;
- 3) разрушение дисперсной фазы до состояния равномерно распределенных, несвязанных друг с другом элементов;
- 4) полная деструкция структуры дисперсной фазы до раствора солей в дисперсионной среде (минеральном масле).

На двух первых этапах пластичная смазка на фоне некоторого ухудшения показателей сохраняет свои эксплуатационные свойства, последующие этапы являются необратимыми и ведут к полной потере работоспособности ПСМ и связанному с этим выходу узла трения из нормального режима эксплуатации.



Разрушение ПСМ, модифицированных пакетом наноразмерных добавок, наблюдается на более поздних стадиях трибоконтакта по сравнению со смазкой без модифицирующих добавок и обусловлено повышенной прочностью и улучшенной маслоудерживающей способностью их бинарной дисперсной фазы. При этом освобождающиеся из структурного каркаса частицы противозадирных добавок продолжают обеспечивать высокую работоспособность смазочного материала на поздних стадиях трибовзаимодействия.

Анализ структуры дисперсной фазы взятой пробы смазочного материала на любом этапе триботехнических испытаний или эксплуатации узла трения позволяет судить о работоспособности пластичной смазки и сделать оценку ее остаточного ресурса.

Применение смазки ИТМОЛ-150Н с пакетом твердых добавок, обладающей приработочным эффектом, наиболее целесообразно в низкоскоростных тяжелонагруженных узлах трения скольжения. Сопоставление результатов лабораторных испытаний пары трения «металлопластмассовая лента DX1 – сталь 40ХН» указывает на перспективность применения комплексной литиевой смазки ИТМОЛ-150Н с пакетом наноразмерных добавок в шаровой опоре цилиндра подвески карьерного самосвала БелАЗ, поскольку обеспечивает увеличение прогнозного ресурса вкладыша шаровой опоры в 1,5...2,0 раза, а также в ряде других узлов трения карьерного самосвала БелАЗ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ищук, Ю.Л. Состав структура и свойства пластичных смазок / Ю.Л. Ищук. – Киев: Наук. думка, 1996. – 510 с.
2. Сажевые смазки / И.В. Шульженко [и др.]. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1983. – 44 с.
3. Пластичная комплексная литиевая смазка и способ ее получения: пат. 13722 Респ. Беларусь, МПК7 С 10М 169/00, С 10 М 177/00 / В.И. Жорник, А.В. Ивахник; заявитель ОИМ НАН Беларуси. – № а 20081584; заявл. 10.12.2008; опубл. 30.10.2010 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 3. – С. 106.
4. Триботехнические свойства полимерных композитов в присутствии пластичной смазки с наноразмерными добавками / П.А. Витязь // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. тр. VII междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 29–30 апр. 2009 г.: в 3-х т. Т. 2 / под ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика. – Новополоцк: ПГУ, 2009. – С. 3–11.
5. Препарирование пластичных смазок для исследования их структурного каркаса методом сканирующей электронной микроскопии / В.А. Чекан [и др.]. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2005. – № 8. – С. 36–38.
6. Формирование износостойких поверхностных структур и механизм их разрушения при трении в среде смазочного материала, модифицированного ультрадисперсными алмазографитовыми добавками / П.А. Витязь [и др.]. Ч. 1. Триботехнические свойства // Трение и износ. – 2006. – Т. 27, № 1. – С. 61–68.

Поступила 30.06.2014

#### THE STRUCTURE EVOLUTION OF DISPERSED PHASE OF GREASES DURING TRIBOLOGICAL CONTACT AND ITS INFLUENCE ON RESOURCE OF FRICTION UNITS

V. ZHORNIK

*The article presents the mechanism of evolution of structure of the dispersed phase of grease during tribological contact of friction pair. It is shown that the destruction of greases modified by nanosized additives occurs at later stages of tribological contact as compared to unmodified greases and it is caused by the increased strength and improved oil-retaining capacity of binary dispersed phase of modified greases. At the same time the released from structural skeleton nanosized particles of extreme pressure additives continue to provide the high operability of grease in the later stages of tribological contact. The analysis of the structure of the dispersed phase of the grease at any stage of tribological testing or operation of the friction unit gives an indication of the operability of the grease and assess its residual resource.*